ISSN 0853-2982 eISSN 2549-2659

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang

Evaluasi Numerik Kapasitas Geser Profil Baja Sayap Lebar: Konsiderasi Ragam Kegagalan dan Pengaruh Kelengkungan Pelat Badan

Helmy Hermawan Tjahjanto*

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan,
E-mail: helmy.hermawan@unpar.ac.id

Giovanny Juvent Feliciana

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan,
E-mail: vannyfeliciana@gmail.com

Wivia Octarena Nugroho

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan,
E-mail: wivia.octarena@unpar.ac.id

Abstrak

Kapasitas geser balok baja sayap lebar, dengan rasio tinggi terhadap ketebalan pelat badan yang rendah, dihitung dengan mengasumsikan kapasitas geser tidak terdampak oleh tekuk pelat badan dan ketidaksempurnaan penampang. Berdasarkan studi terdahulu, kelengkungan pelat badan, walaupun dalam batas toleransi, dapat menurunkan kapasitas geser balok secara signifikan. Dalam penelitian ini, ragam kegagalan dan dampak kelengkungan pelat badan terhadap perilaku geser dievaluasi secara numerik menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Kajian dilakukan pada profil-profil penampang sayap lebar dengan ukuran yang beragam dengan kapasitas geser nominal ditentukan oleh kelelehan geser pelat badan. Setiap penampang dianalisis dalam kondisi sempurna, yaitu tanpa kelengkungan pelat badan, dan dengan kelengkungan pelat badan dengan penyimpangan maksimum sesuai batasan toleransi JIS 3192:2008. Hasil evaluasi menunjukan pada sebagian kecil model dengan penampang sempurna terjadi tekuk pelat badan yang menurunkan kapasitas geser hingga 4,3%, dari kapasitas nominal. Dampak kelengkungan pelat badan terhadap perilaku geser adalah ragam kegagalan tekuk pelat badan dan penurunan kapasitas geser hingga 14,6% dibandingkan kapasitas geser penampang sempurna. Rekomendasi penyesuaian parameter desain geser berdasarkan hasil evaluasi numerik mencakup faktor reduksi kekuatan geser pasca-tekuk, C_{v1}, menjadi 0,95 dan faktor tahanan geser, ϕ_v, menjadi 0,90. Faktor tahanan tersebut berlaku pada batasan penyimpangan maksimum untuk kelengkungan pelat badan sebesar d/150 atau t_w/4.

Kata-kata Kunci : *Analisis numerik, kapasitas geser, kelengkungan pelat badan, profil sayap lebar, tekuk geser.*

Abstract

Shear capacity of wide-flange steel beams with low height-to-thickness web ratio, is calculated assuming the shear capacity is unaffected by web buckling and section imperfections. Previous studies show that web curvature within tolerance limits, can significantly reduce the beam's shear capacity. In this study, the failure modes and the impact of web curvature on shear behavior are evaluated numerically using ABAQUS software. Various wide-flange sections, with nominal shear capacity determined by the web shear yielding, are modelled and analyzed. Each section is analyzed in perfect condition and with web curvature at maximum deviation at the tolerance limits of JIS 3192:2008. The results show web buckling determines the shear capacity of several beams with perfect sections by up to 4,3% of the nominal capacities. The impact of web curvature on shear behavior shifts the failure mode from yielding to web buckling and reduces the shear capacity up to 14,6% compared to the shear capacity of the perfect section. Recommendation for shear design parameters based on the numerical evaluation include a post-buckling shear strength reduction factor, C_{v1}, of 0,95 and a shear resistance factor, ϕ_v, of 0,90, with maximum imperfection limit of web curvature to be taken as d/150 or t_w/4.

Keywords : *Numerical analysis, shear buckling, shear capacity, web curvature, wide-flage section.*

** Penulis Korespondensi: helmy.hermawan@unpar.ac.id*

Diterima 18 Februari 2026, Direvisi 23 April 2026, Diterima untuk dipublikasikan 23 April 2026

Copyright © 2026 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2026.33.1.4

1. Pendahuluan

Kegagalan geser pada balok baja merupakan kondisi batas yang cenderung terjadi dengan deformasi inelastis yang terbatas. Dalam hierarki desain kapasitas struktur rangka momen khusus, kapasitas geser balok baja didesain terhadap gaya geser yang terjadi setelah sendi plastis lentur pada balok terbentuk (AISC341-22 dan SNI7860:2020), sehingga kegagalan geser balok tidak terjadi secara prematur. Oleh karena itu, kapasitas geser harus didesain secara konservatif. Namun, kapasitas geser balok profil sayap lebar (wide flange sections) umumnya dievaluasi dengan pendekatan klasik yang mengasumsikan pelat badan lurus dan mekanisme kegagalan berupa leleh geser penuh. Asumsi ini tercermin dalam rumus kekuatan geser nominal yang digunakan di dalam persamaan desain AISC360-22 untuk kekuatan geser balok baja sayap lebar, kapasitas geser pada penampang dengan rasio tinggi terhadap ketebalan pelat badan, $h/tw < 2{,}24\sqrt{(E/Fy)}$ ditentukan oleh kelelehan geser material baja pada pelat badan, diindikasikan dengan faktor reduksi kekuatan geser pasca-tekuk, Cv1 sebesar 1,0. Selain itu, faktor tahanan untuk geser, ϕv, pada kategori penampang tersebut, ditetapkan sebesar 1,0, yang mengindikasikan rendahnya tingkat kerentanan terhadap faktor-faktor yang dapat mempengaruhi kekuatan dan ragam kegagalan, termasuk ketidaksempurnaan geometri penampang. Mekanisme geser aktual tidak selalu mengikuti idealisasi ini ketika struktur mengalami ketidaksempurnaan geometri.

Ketidaksempurnaan geometri penampang sangat mungkin terjadi akibat proses fabrikasi. Masungi dkk. (2024a) menyelidiki ketidaksempurnaan web out-of-flatness pada balok pelat baja fabrikasi melalui pengukuran lapangan yang ekstensif. Menggunakan sistem pengukuran Adjustable Laser Widget (ALW) berbasis laser, penelitian ini menunjukkan bahwa ketidaksempurnaan badan sebenarnya tidak beraturan, terlokalisasi, dan seringkali tidak berada di tengah, bukan berupa eigenmode sinusoidal yang halus. Rata-rata maksimum out-of-flatness yang terukur adalah sekitar d/170, sedangkan pengukuran garis tengah konvensional secara signifikan meremehkan amplitudo ketidaksempurnaan sebenarnya. Masungi dkk. (2024b) kemudian melakukan studi lanjutan elemen hingga nonlinier balok pelat yang dikenai geser. Hasil menunjukkan bahwa ketidaksempurnaan badan secara signifikan memengaruhi degradasi kekakuan, perkembangan leleh, dan perilaku pasca-tekuk. Studi tersebut menyimpulkan bahwa ketidaksempurnaan terukur yang realistis dan ketidaksempurnaan eigenmode yang diidealkan menghasilkan mekanisme kegagalan yang serupa, tetapi ketidaksempurnaan eigenmode sering melebih-lebihkan tingkat keparahan ketidaksempurnaan. Studi menunjukkan bahwa perilaku geser sangat sensitif terhadap besarnya ketidaksempurnaan dan kelangsingan badan, khususnya untuk badan ramping yang mengalami aksi medan tegangan. Sensitivitas perilaku yang didominasi oleh geser terhadap ketidaksempurnaan juga diamati oleh Abu-Hamd dan El Samman (2014) pada balok tapered yang dikenai geser. Menggunakan perangkat lunak elemen hingga ANSYS dengan elemen cangkang nonlinier, studi menunjukkan bahwa ketidaksempurnaan geometris dan tegangan sisa dapat mengurangi kekuatan geser maksimum hingga 24% pada badan kompak dan nonkompak. Selain itu, balok tapered menunjukkan mekanisme ketidakstabilan yang berbeda tergantung pada orientasi kompresi diagonal, menyoroti pentingnya perilaku tekuk geser yang bergantung pada geometri.

Shayan dkk. (2014) mengusulkan metodologi berbasis eigenmode probabilistik untuk memodelkan ketidaksempurnaan dalam analisis rangka baja tingkat lanjut. Studi menunjukkan bahwa ketidaksempurnaan aktual tidak dapat direpresentasikan secara memadai menggunakan bentuk mode deterministik tunggal karena struktur nyata menunjukkan kombinasi acak dari beberapa mode ketidakstabilan. Penggunaan beberapa eigenmode secara signifikan meningkatkan realisme analisis elemen hingga nonlinier dan menyimpulkan bahwa pemodelan ketidaksempurnaan harus dikalibrasi secara statistik. Gérard dkk. (2019) meninjau pengaruh bentuk ketidaksempurnaan pelat badan terhadap perilaku balok penampang I yang dilas dan digulung yang dikenai kompresi dan lentur yang dianalisis secara numerik dengan dua pola hipotesis, yaitu sesuai gelombang sinus dan sesuai ragam tekuk pertama. Penelitian menyimpulkan bahwa amplitudo ketidaksempurnaan memiliki pengaruh yang lebih besar pada ketahanan struktural daripada bentuk ketidaksempurnaan yang tepat.

Signifikansi topologi ketidaksempurnaan lebih lanjut diselidiki oleh Kovacevic dkk. (2021), yang mempelajari ketidaksempurnaan geometris yang tidak menguntungkan pada balok pelat baja yang dikenai beban patch lokal. Studi menunjukkan bahwa ketidaksempurnaan collapse-affine lokal, khususnya yang terkonsentrasi di dekat daerah badan kritis, dapat menghasilkan ketahanan ultimit yang lebih rendah daripada ketidaksempurnaan eigenmode pertama konvensional. Ketidaksempurnaan yang paling tidak menguntungkan adalah yang sesuai dengan mekanisme keruntuhan akhir daripada mode tekuk elastis pertama. Studi ini memberikan kemajuan konseptual yang penting dengan menghubungkan topologi ketidaksempurnaan secara langsung dengan perilaku keruntuhan nonlinier.

Beberapa studi juga menyoroti pentingnya interaksi

Diterima 18 Februari 2026, Direvisi 23 April 2026, Diterima untuk dipublikasikan 23 April 2026
Copyright © 2026 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2026.33.1.4

ketidakstabilan. Ragheb (2015) mengembangkan kerangka kerja tekuk lokal inelastis analitis yang secara eksplisit memperhitungkan interaksi sayap-badan pada balok I tersusun dengan las. Studi tersebut menunjukkan bahwa kekompakan sayap dan badan tidak dapat diperlakukan secara independen karena resistensi tekuk lokal bergantung pada interaksi antara kedua komponen pelat. Persamaan kekompakan yang diusulkan secara eksplisit menggabungkan rasio aspek penampang dan kelangsingan badan, menunjukkan bahwa ketidakstabilan pada elemen baja pada dasarnya didorong oleh perilaku interaksi. Konsep ini diperluas lebih lanjut oleh Shi dan Xu (2019), yang secara eksperimental dan numerik menyelidiki perilaku tekuk lokal balok penampang I las baja berkekuatan tinggi. Tekuk badan lokal sering terjadi sebelum ketidakstabilan sayap dan penampang ramping mengembangkan kekuatan cadangan pascatekuk yang signifikan. Temuan mereka menyoroti pentingnya peningkatan ketidakstabilan lokal dan mekanisme pascatekuk. Kerangka interaksi yang lebih komprehensif kemudian dikembangkan oleh Wang dkk. (2020), yang menyelidiki tekuk lokal dan global yang digabungkan pada balok baja berkekuatan tinggi yang dilas. Melalui model elemen hingga ABAQUS dengan elemen cangkang yang menggabungkan ketidaksempurnaan geometris, tegangan sisa, dan nonlinieritas material, Wang dkk. (2020) menunjukkan bahwa tekuk lokal dan tekuk lateral-torsional berinteraksi kuat pada anggota HSS ramping. Studi ini memperkenalkan parameter kelangsingan umum untuk mewakili kerentanan terhadap ketidakstabilan lokal dan global dan menunjukkan bahwa transisi kegagalan secara progresif dari tekuk lokal ke ketidakstabilan lokal-global yang digabungkan seiring peningkatan kelangsingan balok. Mekanisme ketidakstabilan lokal dan global tidak dapat diperlakukan secara independen pada elemen baja ramping modern.

Peran tegangan sisa dan ketidaksempurnaan ekuivalen dalam analisis ketidakstabilan nonlinier diselidiki lebih lanjut oleh Rossi dkk. (2021) dan Stroetmann dan Fominow (2022). Rossi dkk. (2021) mempelajari tekuk distorsi lateral balok komposit baja-beton dan menunjukkan bahwa resistensi ultimit yang diprediksi sangat bergantung pada distribusi tegangan sisa yang diasumsikan dan amplitudo ketidaksempurnaan geometris. Stroetmann dan Fominow (2022) mengusulkan ketidaksempurnaan geometris ekuivalen yang dikalibrasi untuk desain tekuk lateral-torsional berbasis GNIA (Geometrically Nonlinear Imperfection Analysis) pada elemen penampang I. Studi tersebut menunjukkan bahwa ketidaksempurnaan ekuivalen harus diinterpretasikan sebagai medan destabilisasi pengganti yang mewakili efek gabungan dari tegangan sisa, leleh, penyimpangan fabrikasi, dan nonlinieritas geometris daripada ketidaksempurnaan terukur yang sebenarnya.

Standar konstruksi mengatur pembatasan terhadap ketidaksempurnaan penampang atau penyimpangan dari geometri nominal agar profil baja dapat digunakan dalam konstruksi. Batas toleransi kelengkungan pelat badan yang dijadikan acuan di Indonesia adalah batasan JIS G3192:2008, yang nilainya ditentukan berdasarkan kategori tinggi profil sayap lebar. Dalam satu kategori rentang tinggi profil, batasan kelengkungan pelat badan ditetapkan pada nilai yang sama, baik untuk profil tertinggi dan terendah dalam kategori tersebut. Sebagai contoh, batasan kelengkungan pelat badan sebesar 2 mm berlaku untuk profil sayap lebar dengan tinggi 150 mm dan tinggi 350 mm, atau berturut-turut sebesar 1,3% dan 0,6% dalam rasio terhadap tinggi profil. Perbedaan rasio kelengkungan pelat badan terhadap tinggi profil tersebut dapat menghasilkan perbedaan ragam kegagalan dan kapasitas geser balok. Tjahjanto dkk. (2025) mengevaluasi pengaruh ketidaksempurnaan fabrikasi dalam batas toleransi peraturan terhadap perilaku lentur dan geser balok sayap lebar. Hasil menunjukkan bahwa ketidaklurusan badan dan ketidaksempurnaan geometris asimetris secara signifikan mengurangi ketahanan geser balok hingga 7% di bawah kapasitas geser nominal dan menurunkan daktilitas bahkan ketika ketidaksempurnaan tersebut masih dalam batas toleransi fabrikasi yang diizinkan oleh peraturan. Penurunan kapasitas geser tersebut disebabkan oleh tekuk geser pelat badan yang diinisiasi oleh kelengkungan pelat badan dan kelelehan material baja. Ketidaksempurnaan asimetris memicu tekuk badan lokal dan degradasi geser prematur, sementara ketidaksempurnaan simetris menghasilkan efek yang relatif kecil.

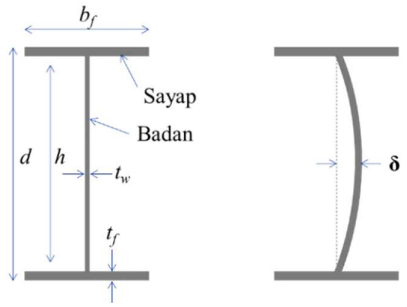
Studi yang ada secara konsisten menunjukkan bahwa perilaku yang terkait dengan geser sangat sensitif terhadap ketidaksempurnaan pelat badan, interaksi ketidakstabilan, dan nonlinieritas geometris, namun parameter persamaan desain AISC360-22, khususnya parameter C_{v1} dan ϕ_v, tidak mengindikasikan kerentanan tersebut. Kelengkungan pelat badan merupakan fenomena acak hasil produksi profil baja, maka kelengkungan pelat badan sulit dikondisikan pada balok yang akan digunakan sebagai spesimen uji eksperimental. Oleh karena itu kajian numerik merupakan metode yang tepat untuk mengkaji dampaknya terhadap kapasitas geser balok. Makalah ini menyajikan hasil kajian numerik terkait permasalahan yang telah diidentifikasi tersebut, dengan tujuan untuk: (1) mengevaluasi ragam kegagalan dan kapasitas geser balok dengan dan tanpa kelengkungan pelat badan; dan (2) menyampaikan rekomendasi terhadap parameter

Diterima 18 Februari 2026, Direvisi 23 April 2026, Diterima untuk dipublikasikan 23 April 2026
Copyright © 2026 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2026.33.1.4

desain kapasitas geser dan batas toleransi kelengkungan pelat badan yang lebih rasional.

2. Metodologi Penelitian

Analisis numerik untuk mengevaluasi perilaku dan kapasitas geser balok baja sayap lebar dilakukan pada penampang sempurna dan penampang dengan ketidaksempurnaan kelengkungan pelat badan **Gambar 1.**. Pemodelan dan analisis dilakukan secara nonlinear dengan bantuan perangkat lunak elemen hingga ABAQUS. Bentuk kelengkungan pelat badan yang dikaji adalah *half-wave* sebagaimana diilustrasikan dalam **Gambar 1(b).**. Nilai penyimpangan maksimum, δ, untuk menghasilkan kelengkungan pelat badan ditetapkan sebesar batas toleransi dalam acuan profil baja sayap lebar di Indonesia yaitu standar JIS G3192:2008. Dalam batasan tersebut, nilai δ untuk tinggi penampang lebih dari 550 mm adalah 3 mm, untuk tinggi penampang di antara 350 mm hingga 550 mm adalah 2.5 mm, dan untuk tinggi penampang kurang dari 350 mm adalah 2 mm. Terdapat 12 penampang sayap lebar dari katalog profil baja spesifikasi teknis *JFE Steel Wide Flange Shapes*, seperti ditampilkan pada **Tabel 1.**. Semua penampang memiliki rasio tinggi terhadap ketebalan pelat badan, $h/t_w < 2{,}24\sqrt{(E/F_y)}$, berdasarkan ketentuan AISC 360–22. Penampang-penampang tersebut dikategorikan sebagai lebar menengah (*medium width*) dan lebar kecil (*small width*) yang lazim digunakan untuk balok struktural. Pada masing-masing kategori, terdapat enam profil dengan tinggi penampang serta ketebalan pelat badan yang berbeda untuk menguji hipotesis bahwa dampak simpangan kelengkungan pelat badan terhadap kapasitas geser dipengaruhi oleh kedua parameter dimensional penampang tersebut.



Gambar 1. Geometri Penampang Sayap Lebar dan Ilustrasi Bentuk Kelengkungan Pelat Badan

Nomenklatur untuk variasi pemodelan, sebagaimana dijabarkan dalam **Tabel 1.**, menunjukkan kategori penampang, tinggi penampang, dan kondisi geometri. Untuk penampang dengan kondisi geometri sempurna, atau tanpa kelengkungan pelat badan, notasi akhir dalam nomenklatur dinyatakan dengan notasi 'S', sedangkan untuk penampang dengan kelengkungan pelat badan, notasi akhir adalah nilai δ dalam mm, dengan penyimpangan sebesar batasan JIS G3192:2008 sesuai tinggi masing-masing penampang.

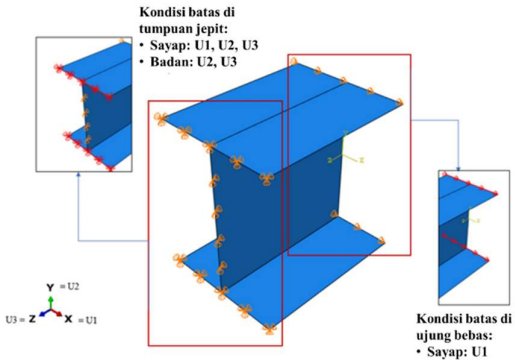
Tabel 1. Variasi dan Nomenklatur Pemodelan

Nomenklatur	Kategori	Dimensi Profil Sayap Lebar, d x b_f x t_w x t_f (mm)	δ (mm)
MW-918-3	*Medium Width*	918x303x19x37	3
MW-890-3		890x299x15x23	3
MW-488-2.5		488x300x11x18	2,5
MW-446-2.5		446x302x13x21	2,5
MW-336-2		336x249x8x12	2
MW-194-2		194x150x6x9	2
SW-612-3	*Small Width*	612x202x13x23	3
SW-596-3		596x199x10x15	3
SW-506-2.5		506x201x11x19	2,5
SW-396-2.5		396x199x7x11	2,5
SW-346-2		346x174x6x9	2
SW-200-2		200x100x5.5x8	2

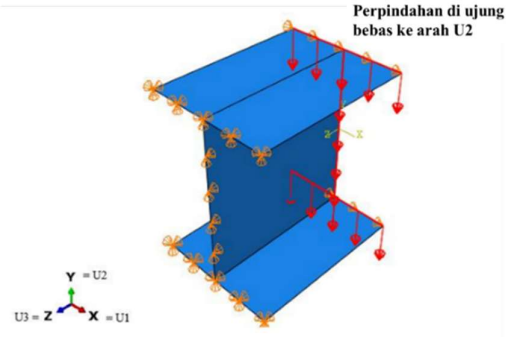
Material baja dimodelkan bersifat elasto–plastis yang merepresentasikan mutu SS400 (Fy = 245 MPa, E = 200000 MPa, dan ν = 0,3). Hubungan tegangan-regangan yang diinput berupa nilai true stress dan true strain. Kondisi ultimit material adalah elongasi inelastis sebesar 18,9%. Elemen pelat sayap dan pelat badan balok dimodelkan dengan elemen shell yang digambarkan berada pada tengah ketebalan pelat serta mengabaikan adanya radius penebalan pada bagian pertemuan sayap-badan. Panjang balok ditetapkan sama dengan tinggi profil agar balok mengalami gaya geser yang lebih dominan daripada momen lentur. Salah satu ujung balok dimodelkan sebagai tumpuan jepit, sedangkan di ujung lainya berupa ujung bebas, dengan pengaplikasian restraint pada sayap dalam arah U1 untuk memberikan kestabilan balok dalam arah lateral **Gambar 2.**.

Pembebanan diaplikasikan dalam bentuk perpindahan vertikal (ke arah U2) di ujung balok yang tidak ditumpu **Gambar 3.**. Perpindahan ditingkatkan secara monotonik hingga kondisi ultimit material tercapai. Selain non-linieritas material, fitur non-linieritas geometri juga diaktifkan untuk menghasilkan perilaku yang terdampak deformasi elemen struktur pada tahap sebelumnya. Diskretisasi model dilakukan dengan meshing elemen pelat sayap dan badan menjadi elemen-elemen dengan ukuran sekitar 1/20 tinggi penampang balok, berdasarkan nilai optimal hasil uji sensitivitas numerik **Gambar 4.**.

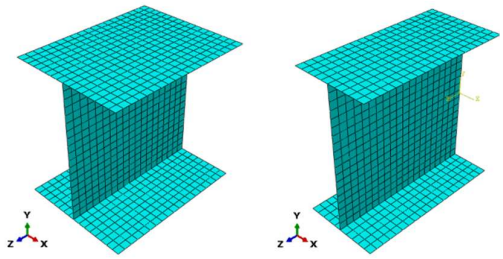
Diterima 18 Februari 2026, Direvisi 23 April 2026, Diterima untuk dipublikasikan 23 April 2026
Copyright © 2026 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2026.33.1.4



Gambar 2. Kondisi Batas Pemodelan Balok



Gambar 3. Pembebanan Balok sebagai Perpindahan Vertikal



(a) *Medium width* (contoh: MW-194) (b) *Small width* (contoh: SW-200)

Gambar 4. Diskretisasi Elemen

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis disajikan berupa gaya geser, V, yang disajikan dalam bentuk rasio terhadap gaya geser nominal, V_n, dan diplot terhadap perpindahan vertikal, untuk kelompok penampang kategori *medium width* **Gambar 5.** dan untuk kelompok penampang kategori *small width* **Gambar 6.**. Dalam kedua gambar tersebut, setiap warna mewakili satu ukuran penampang. Kondisi penampang dibedakan dengan jenis garis kurva, yaitu garis putus-putus (*dashed*) untuk kondisi sempurna dan garis utuh (*continuous*) untuk kondisi dengan kelengkungan pelat badan. Gaya geser, V, adalah total gaya vertikal yang mengakibatkan perpindahan vertikal di ujung bebas balok.

Pada kedua kelompok penampang tersebut, kelengkungan pelat badan berdampak pada penurunan kapasitas geser yang ditunjukkan dengan posisi kurva untuk kondisi dengan kelengkungan selalu berada di bawah kurva untuk kondisi sempurna, di setiap warna atau ukuran penampang. Pada fase awal, yaitu saat balok masih berperilaku elastis, kemiringan kurva untuk penampang sempurna dan untuk penampang dengan kelengkungan pelat badan relatif sama. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kelengkungan pelat badan tidak berpengaruh terhadap kekakuan elastis balok yang mengalami gaya geser.

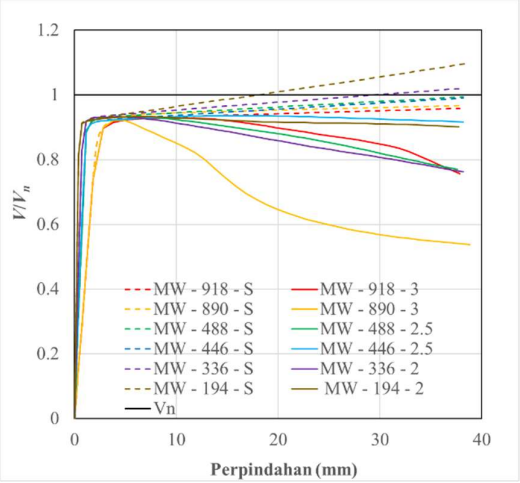
Pada kelompok penampang kategori *medium width* **Gambar 5.**, penurunan gaya geser di fase inelastis tidak terlihat pada kondisi sempurna. Perilaku yang berbeda terlihat pada kelompok penampang kategori *small width* **Gambar 6.** untuk model SW-346-S dan SW-396-S yang mengalami penurunan gaya geser secara drastis di fase inelastis. Hal tersebut mengindikasikan penampang balok mengalami ragam kegagalan instabilitas selain kelelehan material, walaupun penampang dalam kondisi sempurna dan secara nominal kapasitas gesernya ditentukan oleh kelelehan geser pelat badan. Kapasitas geser, yang didefinisikan sebagai nilai gaya geser maksimum sampai kondisi ultimit, untuk sebagian besar penampang kondisi sempurna berada di bawah kapasitas geser nominal, V_n, kecuali untuk model MW-336-S, MW-194-S, dan SW-200-S, yang merupakan model-model balok dengan tinggi penampang terkecil di kelompok kategori *medium width* dan *small width*.

Kecenderungan penurunan gaya geser di fase inelastis terjadi di seluruh model penampang dengan kelengkungan pelat badan, baik untuk kelompok penampang kategori *medium width* maupun kategori *small width*. Penurunan gaya geser terlihat lebih drastis pada model MW-896-3, SW-346-2 dan SW-396-2.5, dan SW-596-3, hingga gaya geser yang dapat dipikul pada kondisi ultimit hanya sekitar 60% dari nilai maksimum. Pada model MW-336-2 dan MW-446-2.5, gaya geser yang mampu dipikul relatif konstan sejak memasuki fase inelastis. Secara umum, kelengkungan pelat badan berdampak lebih besar terhadap kapasitas geser penampang pada kelompok penampang kategori *small width*.

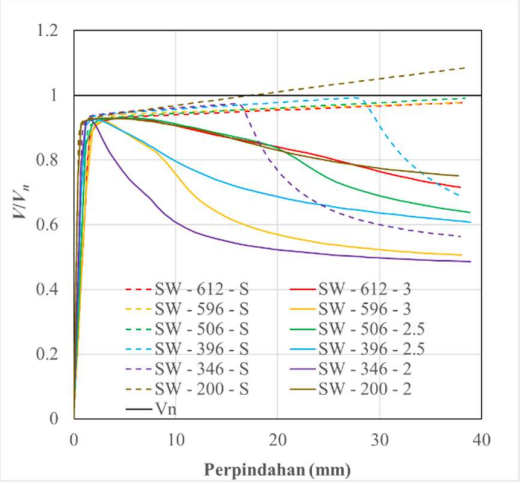
Nilai gaya geser maksimum setiap kurva pada **Gambar 5.** dan **Gambar 6.** didefinisikan sebagai kapasitas geser penampang kondisi sempurna, V_p, kapasitas geser penampang dengan kelengkungan pelat badan, $V_{p\delta}$. Kapasitas geser hasil analisis tersebut, bersama dengan nilai kapasitas geser nominal, V_n, setiap penampang, beserta rasio, V_p/V_n dan $V_{p\delta}/V_p$ diringkas dalam **Tabel 2.**. Dari tabel tersebut diperoleh rasio V_p/V_n terkecil adalah 0,957 untuk model MW-918-S. Rasio $V_{p\delta}/V_p$ terendah terjadi pada model MW-194-2 dan SW-200-2, berturut

Diterima 18 Februari 2026, Direvisi 23 April 2026, Diterima untuk dipublikasikan 23 April 2026
Copyright © 2026 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2026.33.1.4

berturut-turut sebesar 0,854 dan 0,857. Rasio tersebut kontradiktif dengan rasio V_p/V_n untuk ukuran profil yang sama dalam kondisi sempurna, yaitu MW-194-S dan SW-200-S, yang merupakan nilai tertinggi di antara keseluruhan model. Berdasarkan kedua hal tersebut dapat disimpulkan bahwa kapasitas geser profil sayap lebar dengan tinggi penampang yang kecil ditentukan oleh kelelehan geser pelat badan serta dapat mencapai kapasitas geser nominal, namun lebih rentan mengalami penurunan kapasitas geser jika terdapat kelengkungan pelat badan.



Gambar 5. Kurva Gaya Geser vs Perpindahan Vertikal pada Penampang *Medium Width*



Gambar 6. Kurva Gaya Geser vs Perpindahan Vertikal pada Penampang *Small Width*

Selain kapasitas geser dan perilaku global dalam bentuk hubungan gaya geser vs perpindahan vertikal, ragam kegagalan geser balok juga dievaluasi. Bentuk terdeformasi dan kontur kelelehan dalam parameter regangan plastis ekuivalen (PEEQ) pada kondisi ultimit, untuk penampang penampang sempurna dan dengan kelengkungan pelat badan, disajikan dalam **Gambar 7.** Dan **Gambar 8.** berturut-turut. Gradasi warna menunjukkan nilai regangan plastis suatu elemen. Warna biru menjelaskan kondisi suatu elemen yang belum mengalami kelelehan, sedangkan warna merah menunjukkan nilai regangan maksimum, yaitu tercapainya regangan ultimit sebesar 0,189.

Tabel 2. Hasil Analisis Kapasitas Geser Penampang

Model	V_n (kN)	V_p (kN)	$V_{p\delta}$ (kN)	V_p/V_n	$V_{p\delta}/V_p$
MW-918	2564.0	2453.1	2381.6	0.957	0.971
MW-890	1962.5	1897.8	1811.5	0.967	0.955
MW-488	789.1	785.8	735.2	0.996	0.936
MW-446	852.3	844.3	798.2	0.991	0.945
MW-336	395.1	403.9	368.5	1.022	0.912
MW-194	171.1	186.9	159.6	1.092	0.854
SW-612	1169.5	1148.9	1086.6	0.982	0.946
SW-596	876.1	856.5	806.0	0.978	0.941
SW-506	818.2	810.6	760.6	0.991	0.938
SW-396	407.5	404.2	377.1	0.992	0.933
SW-346	305.2	297.1	282.4	0.974	0.951
SW-200	161.7	175.5	150.3	1.085	0.857

Pada balok dengan penampang sempurna **Gambar 7.**, terlihat bahwa kelelehan di sebagian besar pelat badan terjadi pada semua kelompok penampang kategori *medium width*. Pada kelompok penampang kategori *small width* terdapat kondisi kelelehan yang terkonsentrasi di sebagian kecil luasan pelat badan, yaitu model SW-346-S dan SW-396-S, bersamaan dengan deformasi tekuk akibat geser pada pelat badan. Hal tersebut memvalidasi terjadinya penurunan gaya geser di fase inelastis, yang terindikasi dari kurva gaya geser vs perpindahan vertikal. Pada balok dengan kelengkungan pelat badan, tekuk geser pelat badan terjadi di semua ukuran penampang pada kondisi ultimit **Gambar 8.**.

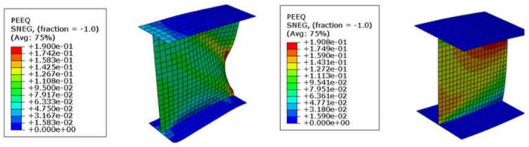
Kelelehan material akibat geser untuk model MW-446-2.5 dan MW-194-2 terdistribusi di seluruh bagian pelat badan. Distribusi kelelehan tersebut menghasilkan perilaku geser yang cenderung stabil di fase inelastis, tanpa penurunan gaya geser yang signifikan, seperti terlihat pada kurva dalam Gambar 5. Pada model MW-890-3, SW-596-3, SW-396-2.5, dan SW-346-2 kelelehan terkonsentrasi pada sebagian kecil area pada pelat badan. Hal tersebut juga mengkonfirmasi penurunan gaya geser secara drastis di fase inelastis pada kurva gaya geser vs perpindahan vertikal **Gambar 5.** dan **Gambar 6.**.

Evaluasi perilaku geser berdasarkan kurva gaya geser vs perpindahan vertikal **Gambar 5.** dan **Gambar 6.** dan kontur kelelehan di kondisi ultimit **Gambar 7.** dan **Gambar 8.**, terdapat korelasi yang konsisten yaitu penurunan gaya geser secara drastis

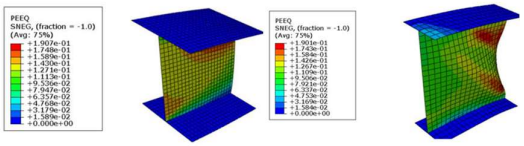
Diterima 18 Februari 2026, Direvisi 23 April 2026, Diterima untuk dipublikasikan 23 April 2026
Copyright © 2026 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2026.33.1.4

di fase inelastis diakibatkan oleh tekuk geser pelat badan dan terbatasnya bagian pelat badan yang mengalami kelelehan material. Secara umum, kelompok penampang kategori *small width*, dengan dan tanpa ketidaksempurnaan penampang, cenderung mengalami kegagalan secara lebih getas dibandingkan penampang kategori *medium width*. Hal tersebut ditunjukkan dengan terdapatnya penurunan gaya secara tiba-tiba akibat tekuk pelat badan serta sebaran kelelehan yang lebih terbatas. Fenomena ini menunjukkan adanya kontribusi kekakuan lateral pelat sayap dalam menahan ketidakstabilan lateral pelat badan balok.

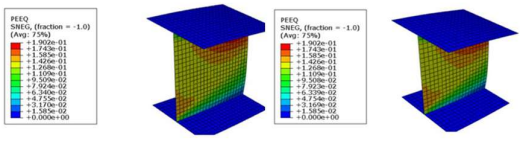
Korelasi antara rasio kapasitas geser pada kondisi penampang sempurna terhadap kapasitas geser nominal, V_p/V_n, dengan parameter geometri penampang dalam bentuk rasio h/t_w disajikan dalam Gambar 9. Terdapat kecenderungan nilai V_p/V_n kurang dari 1,0 untuk penampang dengan rasio h/t_w yang tinggi, yang menunjukkan kerentanan tekuk geser pelat badan pada penampang sayap lebar dengan pelat badan yang langsing. Rasio V_p/V_n berkaitan dengan faktor reduksi kekuatan geser pasca-tekuk, C_{v1}, yang dalam persamaan desain AISC 360-22 bernilai 1,0 untuk semua penampang yang dikaji. Untuk menghasilkan perhitungan kapasitas geser yang konservatif, nilai C_{v1} perlu disesuaikan dengan rasio V_p/V_n terkecil, yaitu 0,957 **Tabel 2.** atau dapat dibulatkan menjadi 0,95 untuk keperluan desain yang lebih aman.



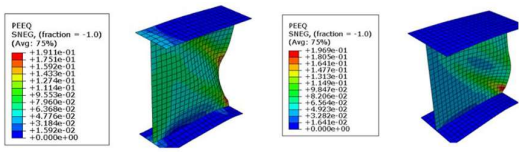
(a). MW-890-S (b). MW-488-S



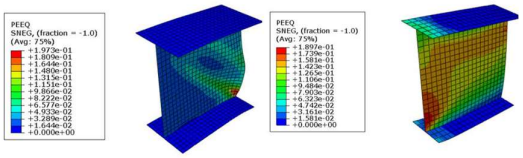
(c). MW-336-S (d). MW-918-S



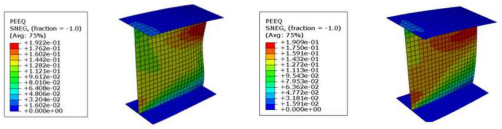
(e). MW-446-S (f). MW-194-S



(g). SW-596-S (h). SW-396-S

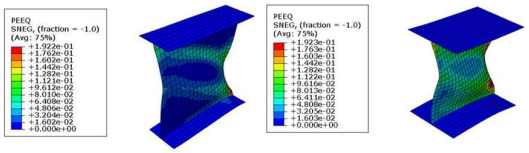


(i). SW-346-S (j). SW-612-S

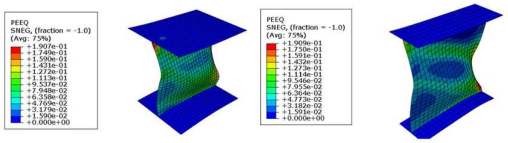


(k). SW-506-S (l). SW-200-S

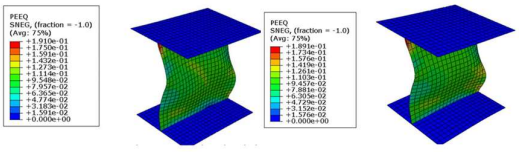
Gambar 7. Kontur Kelelehan Penampang Sempurna (Pada Kondisi Ultimit)



(a). MW-890-3 (b). MW-488-2.5



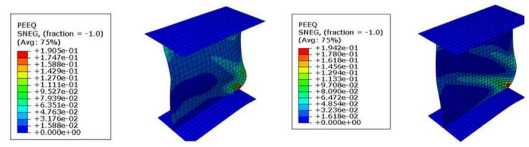
(c). MW-336-2 (d). MW-918-3



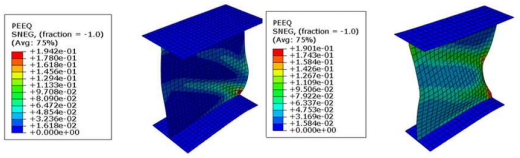
(e). MW-446-2.5 (f). MW-194-2

Gambar 8. Kontur Kelelehan Penampang dengan Kelengkungan Pelat Badan (Pada Kondisi Ultimit)

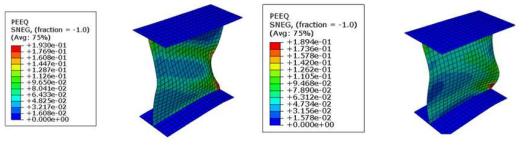
Diterima 18 Februari 2026, Direvisi 23 April 2026, Diterima untuk dipublikasikan 23 April 2026
Copyright © 2026 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2026.33.1.4



(g). SW-596-3 (h). SW-396-2.5



(i). SW-346-2 (j). SW-612-3



(k). SW-506-2.5 (l). SW-200-2

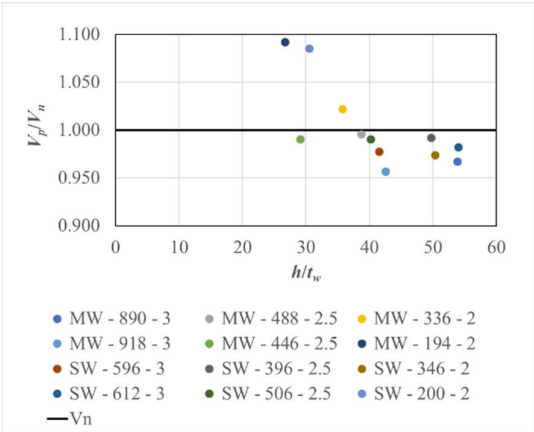
Gambar 9. Kontur Kelelehan Penampang dengan Kelengkungan Pelat Badan (Pada Kondisi Ultimit) (lanjutan)

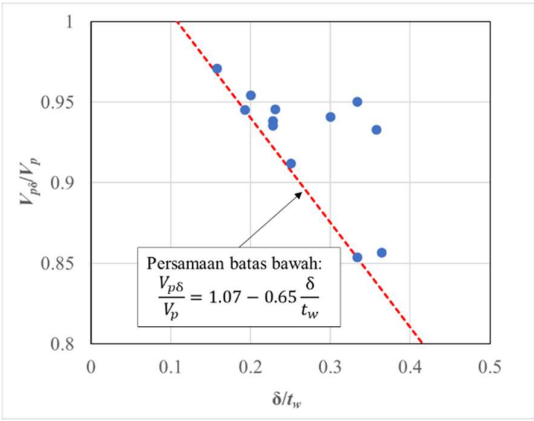
Dampak kelengkungan pelat badan terhadap penurunan kapasitas geser, $V_{p\delta}/V_p$, dievaluasi dengan korelasi antara rasio simpangan kelengkungan pelat badan, δ, terhadap ketebalan pelat badan, t_w, dan tinggi penampang, d, sebagaimana disajikan dalam **Gambar 10.** dan **Gambar 11.**. Sebaran nilai $V_{p\delta}/V_p$ terhadap δ/t_w dan δ/d untuk semua penampang yang dikaji menunjukkan kecenderungan yang serupa, yaitu kapasitas geser penampang menurun jika δ/t_w dan δ/d semakin besar. Dengan pendekatan batas bawah, diperoleh korelasi linier antara $V_{p\delta}/V_p$ dengan δ/t_w dan δ/d yang dijabarkan dalam Persamaan (1) dan Persamaan (2).

$$\frac{V_{p\delta}}{V_p} = 1.07 - 0.65\frac{\delta}{t_w} \quad (1)$$

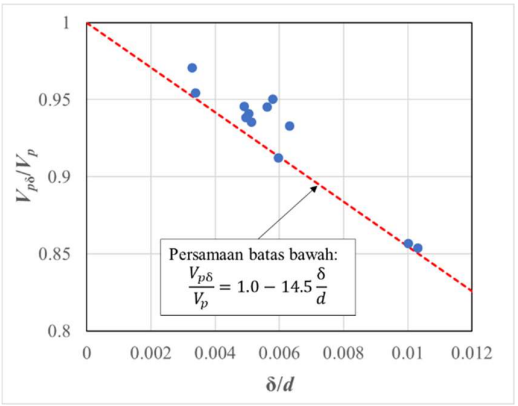
$$\frac{V_{p\delta}}{V_p} = 1.0 - 14.5\frac{\delta}{d} \quad (2)$$

Berdasarkan kedua persamaan tersebut, batasan kelengkungan pelat badan dapat ditentukan dengan menetapkan rasio $V_{p\delta}/V_p$ yang dianalogikan sebagai faktor tahanan untuk geser, ϕ_v, dalam persamaan desain AISC 360-22. Pada semua konfigurasi yang dianalisis menghasilkan rasio $V_{p\delta}/V_p$ kurang dari 1,0, sehingga nilai ϕ_v sebesar 1,0, menjadi tidak konservatif dalam mengantisipasi terjadinya ketidaksempurnaan kelengkungan pelat badan. Oleh karena itu nilai ϕ_v perlu disesuaikan. Berdasarkan (1) dan Persamaan (2), batasan nilai simpangan kelengkungan pelat badan, δ, dapat dinyatakan secara proporsional dengan ketebalan pelat badan, t_w, atau tinggi penampang, d, serta disesuaikan dengan nilai ϕ_v yang digunakan dalam desain. Sebagai ilustrasi, jika ϕ_v ditetapkan sebesar 0,90, maka batasan nilai simpangan kelengkungan pelat badan, δ, berdasarkan Persamaan (1) adalah $0{,}261t_w$ dan berdasarkan Persamaan (2) adalah $0{,}0069d$. Untuk keperluan praktis, dapat direkomendasikan batasan kelengkungan pelat badan, δ, sebesar $t_w/4$ atau $d/150$.





Gambar 10. Kurva Hubungan δ/t_w dengan $V_{p\delta}/V_p$



Gambar 11. Kurva Hubungan δ/d dengan $V_{p\delta}/V_p$

Diterima 18 Februari 2026, Direvisi 23 April 2026, Diterima untuk dipublikasikan 23 April 2026
Copyright © 2026 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2026.33.1.4

4. Kesimpulan

Berdasarkan kajian numerik perilaku geser balok sayap lebar kondisi penampang sempurna dan dengan kelengkungan pelat badan, diperoleh kesimpulan berikut:

1. Ragam kegagalan berupa tekuk pelat badan masih ditemukan pada penampang sempurna dan menghasilkan kapasitas geser yang 4,3% lebih rendah dibandingkan kapasitas geser nominal. Tekuk pelat badan lebih rentan terjadi pada balok dengan rasio kelangsingan pelat badan tinggi dan profil yang termasuk kategori small width. Pada penampang dengan kelengkungan pelat badan yang masih berada dalam batas toleransi JIS G3192:2008 ragam kegagalan tekuk pelat badan menjadi semakin dominan, dan menghasilkan penurunan kapasitas geser hingga sebesar 14,6%.
1. Dalam persamaan desain, faktor reduksi kekuatan geser pasca-tekuk, C_{v1}, sebesar 0,95 direkomendasikan untuk menghasilkan nilai kapasitas geser balok sayap lebar yang konservatif. Modifikasi faktor C_{v1} tersebut diperlukan untuk memperhitungkan kerentanan terjadinya kegagalan tekuk selain kelelehan geser pelat badan. Selain itu, batasan simpangan kelengkungan pelat badan, δ, yang lebih rasional, yaitu sebesar $t_w/4$ atau $d/150$ dapat digunakan bersama dengan penyesuaian faktor tahanan geser, ϕ_v, menjadi sebesar 0,90.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan apresiasi kepada Program Studi Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan yang telah mendukung penelitian ini melalui penyediaan lisensi perangkat lunak ABAQUS.

Daftar Pustaka

Abu-Hamd, M., & El Samman, B. (2017). Effect of imperfections on the ultimate shear strength of tapered girders. *Journal of Constructional Steel Research, 138*, 108–123. doi:10.1016/j.jcsr.2017.07.006

American Institute of Steel Construction. (2022). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-22).*

American Institute of Steel Construction. (2022). *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-22).*

Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Ketentuan Seismik untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (SNI 7860:2020).*

Gérard, L., Li, L., Kettler, M., & Boissonnade, N. (2019). Recommendations on The Geometrical Imperfections Definition for The Resistance of I-sections. *Journal of Constructional Steel Research, 162*, 1-18. doi:10.1016/j.jcsr.2019.105716

Kovačević, S., Marković, N., Šumarac, D., & Šalatić, R. (2021). Unfavorable geometric imperfections in steel plate girders subjected to localized loads. *Thin-Walled Structures,161*. doi:10.1016/j.tws.2021.107451

Masungi, P., Garlock, M., & Quiel, S. (2024). Out-of-flatness of steel plate girder webs, part I: Tolerance review and measurements. *Journal of Constructional Steel Research*. doi:10.1016/j.jcsr.2024.108543

Masungi, P.M., Garlock, M.E.M., Augustyn, K.E., & Quiel, S.E. (2024). Out-of-flatness of steel plate girder webs, Part II: Shear strength and Behaviour. *Journal of Constructional Steel Research, 219*, 1-14. doi:10.1016/j.jcsr.2024.108788

Ragheb, W. F. (2015). Local buckling of welded steel I-beams considering flange–web interaction. *Thin-Walled Structures, 97*, 241–249. doi:10.1016/j.tws.2015.09.003

Rossi, A., de Souza, A., Nicoletti, R., & Martins, C. (2021). The Influence of Structural and Geometric Imperfections on The LDB Strength of Steel–concrete Composite Beams. *Thin-Walled Structures*(1-19), 162. doi:10.1016/j.tws.2021.107542

Shayan, S., Rasmussen, K., & Zhang, H. (2014). On The Modelling of Initial Geometric Imperfections of Steel Frames in Advanced Analysis. *Journal of Constructional Steel Research, 98*, 167-177. doi:10.1016/j.jcsr.2014.02.016

Shi, Y., & Xu, K. (2019). Experimental and analytical study on local buckling behavior of high strength steel welded I-section beams. *International Journal of Steel Structures, 19*(4), 1285–1304. doi:10.1007/s13296-019-00225-9

Stroetmann, R., & Fominow, S. (2022). Equivalent Geometric Imperfections for The LTB-design of Members with I-sections. *Steel Construction, 15*, 213-228. doi:10.1002/stco.202200025

Tjahjanto, H., Hartono, A., & Nugroho, W. (2025). Evaluasi Numerik Dampak Ketidaksempurnaan Penampang dalam Batas Toleransi terhadap Perilaku Lentur dan Geser Balok Baja. *CRANE : Civil Engineering Research Journal, 6*(1), 48-54.

Wang, Y., Bradford, M.A., & Liu, X. (2020). Strength design of welded high-strength

Diterima 18 Februari 2026, Direvisi 23 April 2026, Diterima untuk dipublikasikan 23 April 2026

Copyright © 2026 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2026.33.1.4

steel beams considering coupled local and global buckling. *Thin-Walled Structures, 149*. doi:10.1016/j.tws.2019.106391

Diterima 18 Februari 2026, Direvisi 23 April 2026, Diterima untuk dipublikasikan 23 April 2026

Copyright © 2026 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2026.33.1.4